

はじめての
お ペ あ ん び
オペアンス。

文・絵 梶本

- **mbed講習で少しだけオペアンプを使いますが、初めて見る人がほとんどのようです。何も考えずに配線するのもよろしくないなので、30分で分かる範囲の説明をしました**
- **来年も説明する時のためにまとめておきます**

- **※保護者の方へ：オペアンプの現実的な話、例えば帯域幅、入力オフセット、Rail-to-Rail駆動、ノイズ、など全て省いています。「ここにはこう書いてあるけど本当は…」と教えてあげてください。数式は一度自分で解く必要があるので、小テストもおそらく必要です**

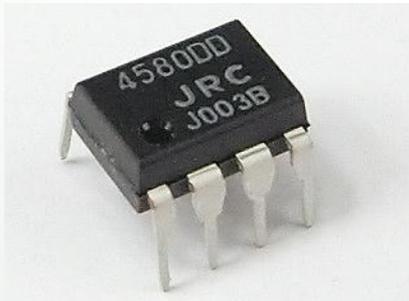
オペアンプの種類 (今は読み飛ばしてよい)

- オペアンプには用途に合わせたいろいろな種類がありますが、
- とりあえず知っておきたいのは…

- 信号用オペアンプ：比較的小さな電流を扱う(mAオーダー)
- パワーオペアンプ：比較的大きな電流を扱う(Aオーダー)
 - **ただし信号用オペアンプでもイヤホン程度は駆動できるものが多いです**

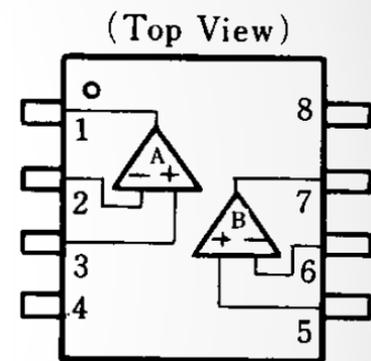
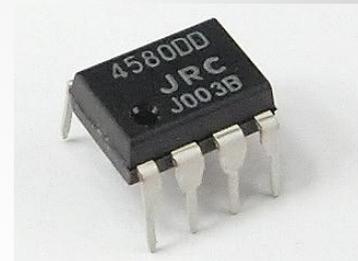
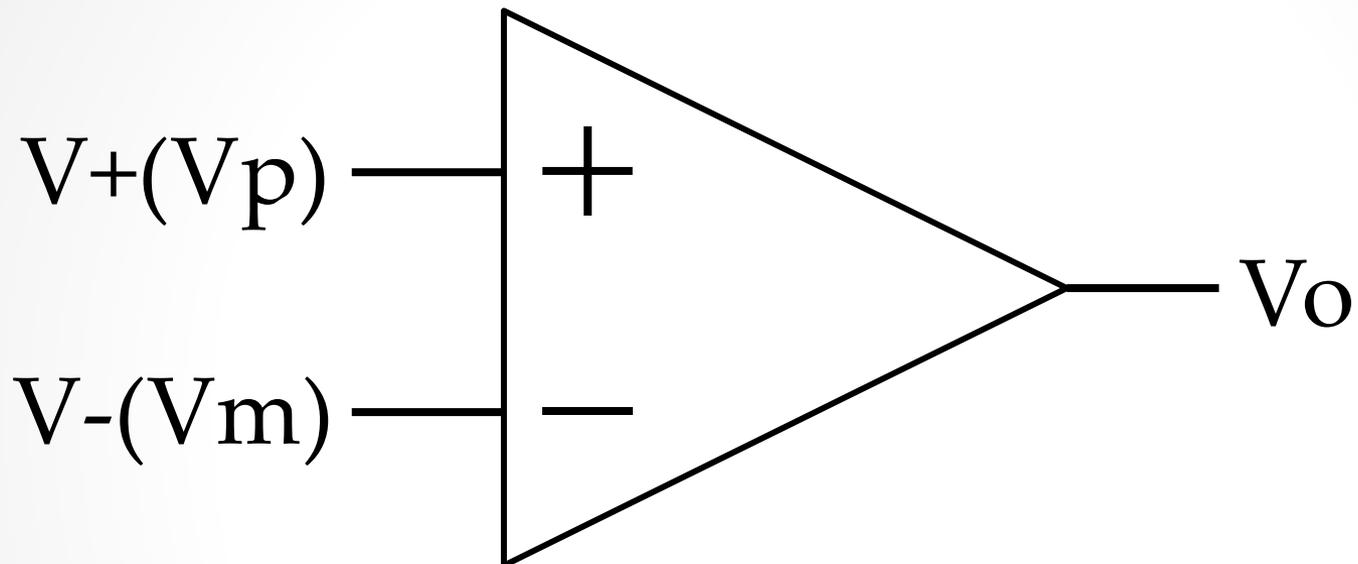


- 両電源オペアンプ：正と負の電源につなげることが前提
- 単電源オペアンプ：正電源とグランドにつなげることが前提
 - **ただし両電源オペアンプでも単電源で駆動できるものも多いです**



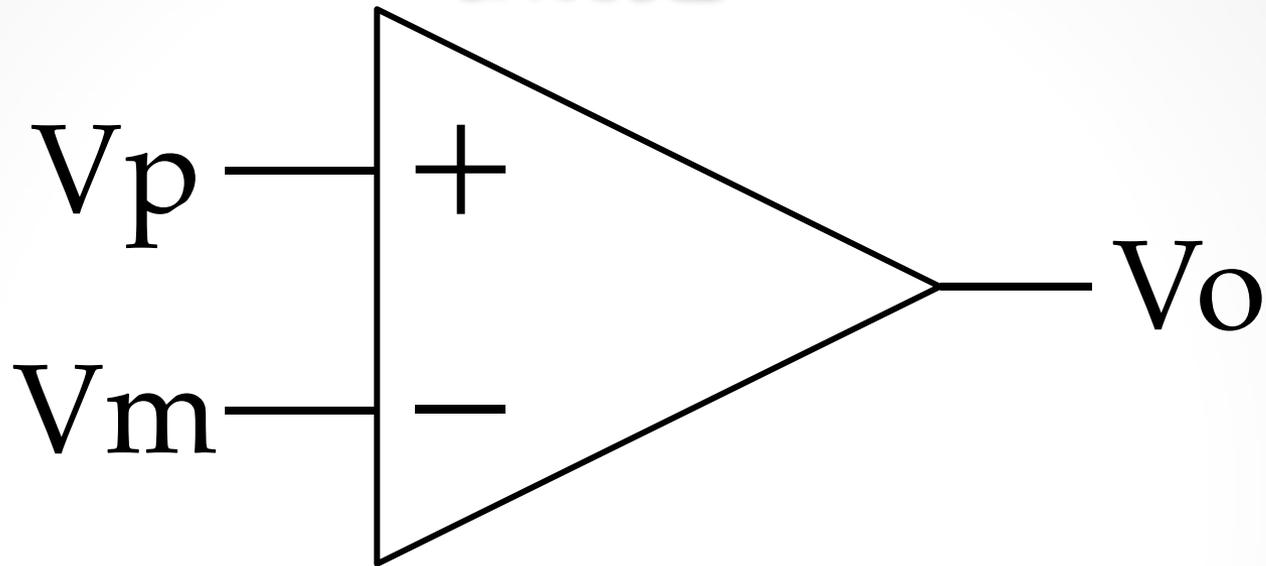
今回出てくるNJM4580は「信号用」の「両電源」オペアンプですが、**イヤホン**を鳴らすために使っていますし、**単電源駆動**させています

入力と出力



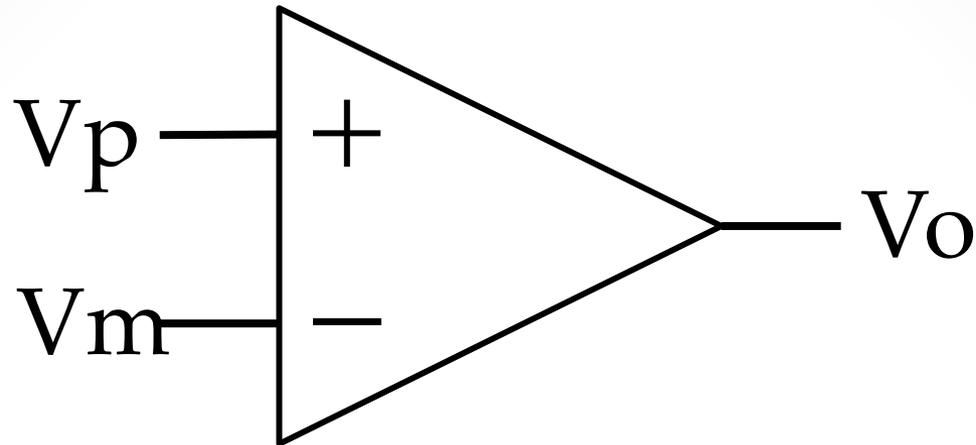
- オペアンプには2つの入力があり、1つの出力があります
- それぞれ、 $V+$ 、 $V-$ 、 V_o と書くことが多いです
- $V+$ 、 $V-$ だと数式で書きづらいので、この資料中では V_p 、 V_m と書くことにします

機能



- オペアンプの機能は単純です
- 「**2つの入力の差を、ほぼ無限倍して出力**」
- これだけです
- 数式で書くと次のようになります
 - **$V_o = A(V_p - V_m)$**
- ただしAは「**非常に**」大きい。少なくとも一百万倍

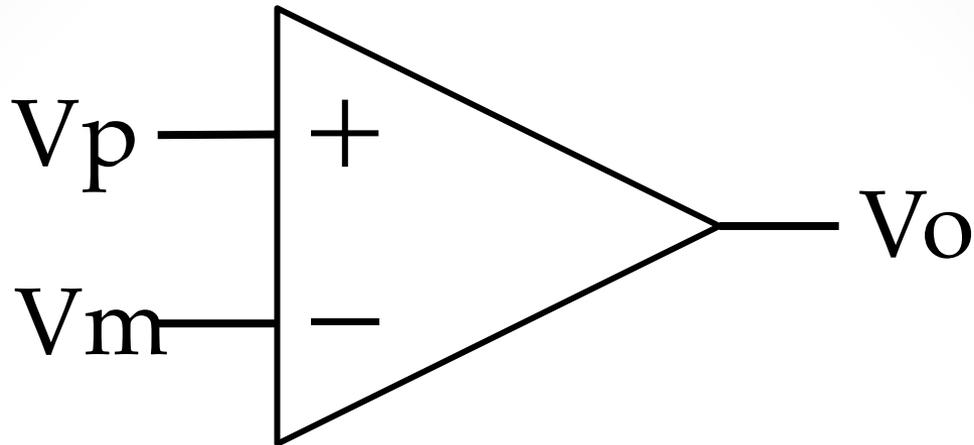
例題



• さっそく例題です。次の場合の出力は何でしょう？

1. $V_p=3.0V, V_m=2.0V$
2. $V_p=4.0V, V_m=5.0V$
3. $V_p=4.0V, V_m=3.99V$

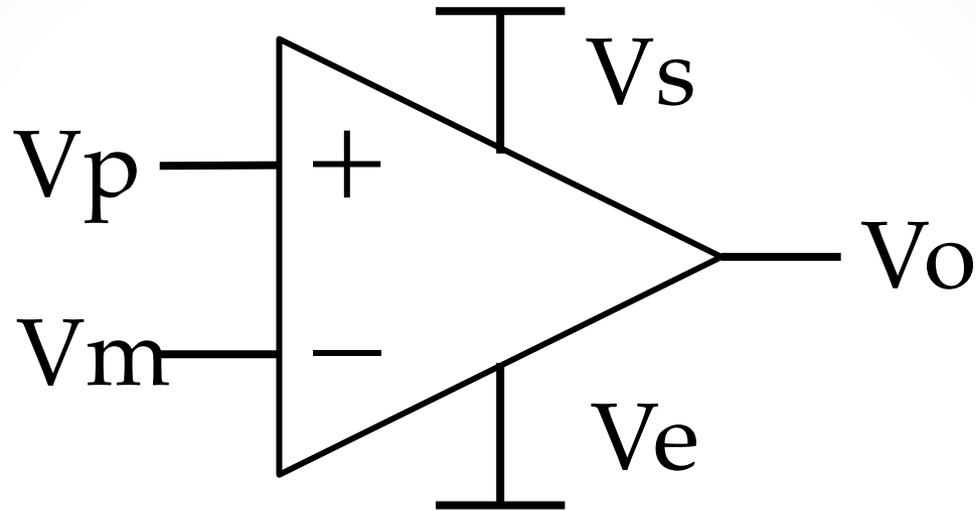
回答



- 「**2つの入力の差を、ほぼ無限倍して出力**」するわけですから、次のようになるはず

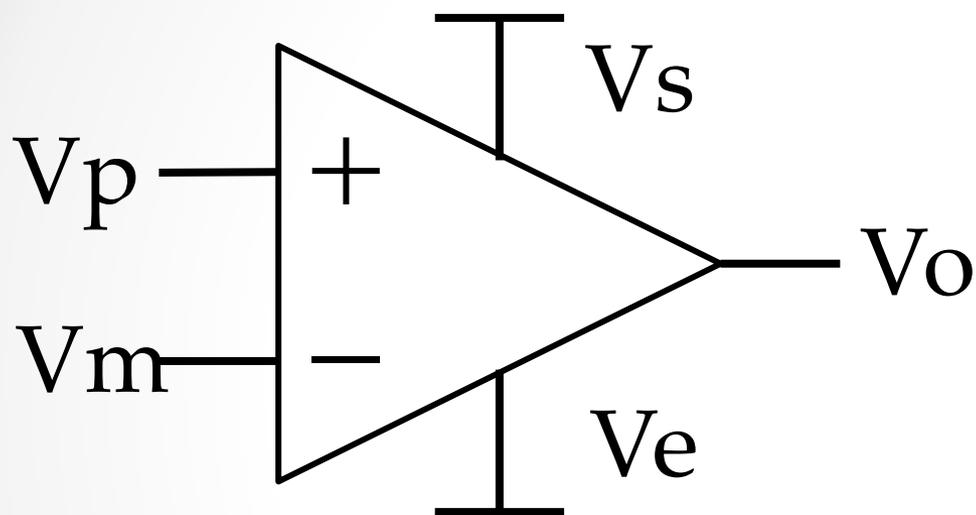
1. $V_p=3.0V, V_m=2.0V \Rightarrow V_o$ はプラス無限大
2. $V_p=4.0V, V_m=5.0V \Rightarrow V_o$ はマイナス無限大
3. $V_p=4.0V, V_m=3.99V \Rightarrow$ このときすら V_o はプラス無限大

電源



- **もちろん実際は、無限大の出力はありません**
- オペアンプには+電源と-電源が接続されています
- ここではそれぞれ V_s 、 V_e と書きます。12V、-12Vとしましょう
- この電源電圧までしか出力できないので、実際には次のようになります
 1. $V_p=3.0V$, $V_m=2.0V$ ⇒ V_o は+12V付近に
 2. $V_p=4.0V$, $V_m=5.0V$ ⇒ V_o は-12V付近に
 3. $V_p=4.0V$, $V_m=3.99V$ ⇒ この場合でも V_o は+12V付近に

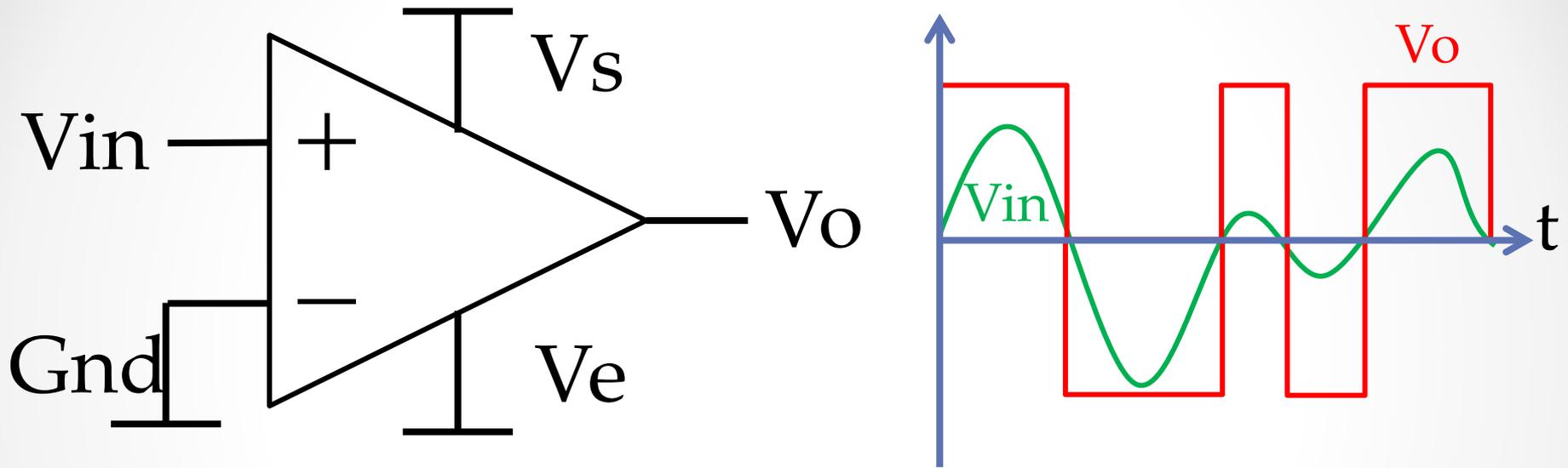
コンパレータ



```
If( $V_p > V_m$ ) {  
     $V_o = V_s$ ;  
} Else {  
     $V_o = V_e$ ;  
}
```

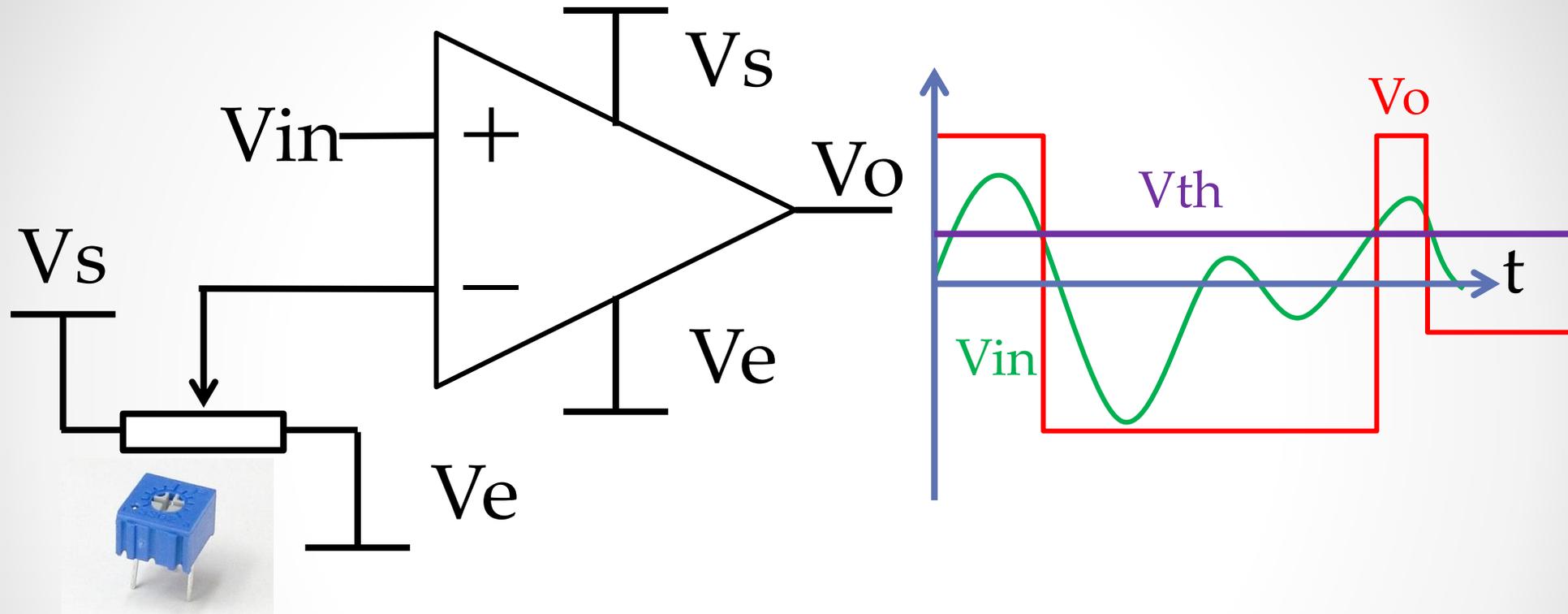
- これはすでに「2つの電圧のどちらが大きいかが**判定**する」という、一つの**機能が実現されている**と言えます。
- これを**コンパレータ**と言います。

正負の判定



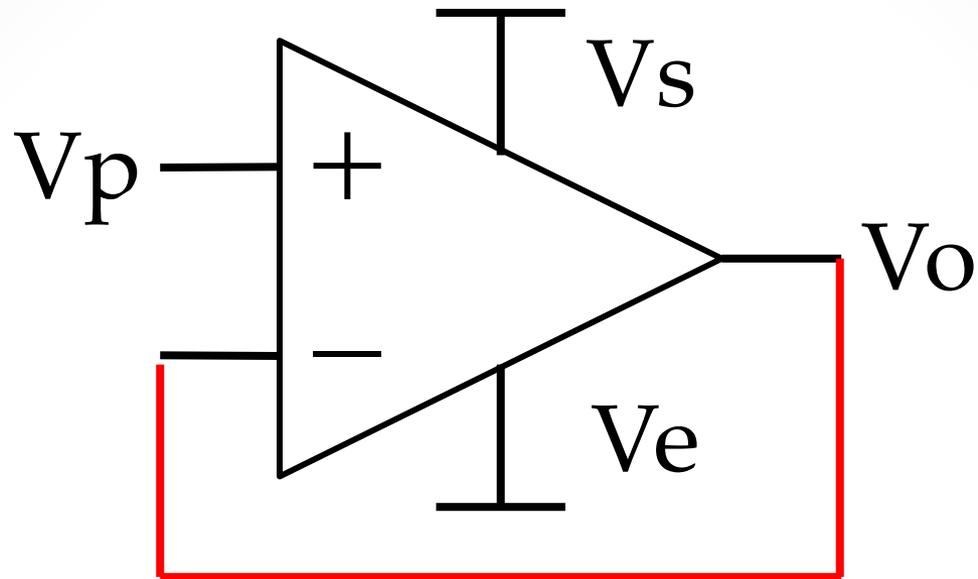
- 例えば V_m を $0V$ に固定すれば、
 - 「入力電圧が正か負かを判定する」
- 回路になります。

閾値の調整



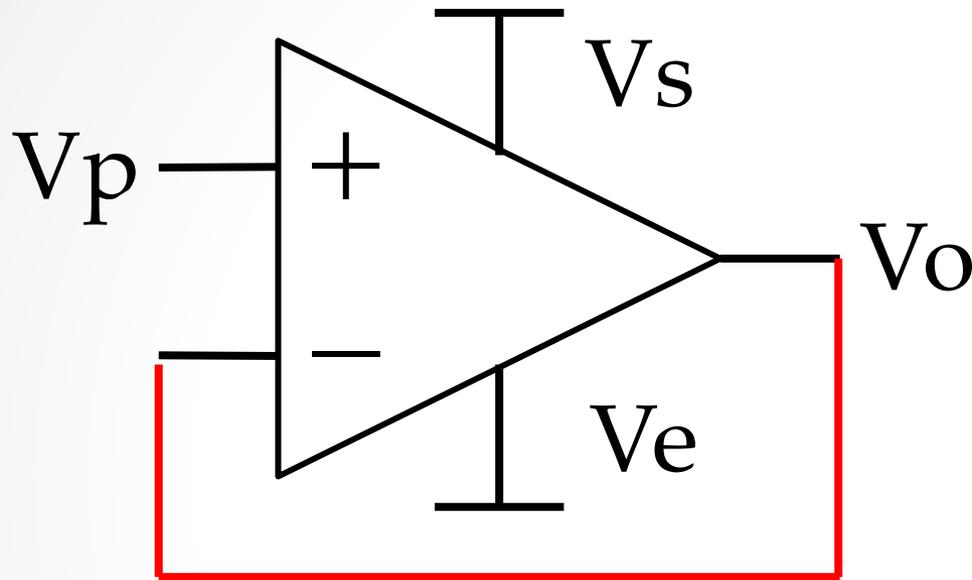
- 可変抵抗で分圧して V_m を自由に変えられるようにしました
- つまみを回すと判定の閾値 (threshold) が変わります
- これは回路に調整部分が生まれた瞬間でもあります

出力を入力につなげる



- 2つの入力の差を無限に増幅することで「判定」という機能が生まれました。
- ここで出力を入力につなげると、とんでもないことが起きそうな数学的予感がします。

予感？



t	V_p	V_m	V_o
0	1.0	0.0	0.0
1	1.0	$+\infty$	$+\infty$
2	1.0	$-\infty$	$-\infty$
3	1.0	$+\infty$	$+\infty$
4	1.0	$-\infty$	$-\infty$
5	1.0	$+\infty$	$+\infty$

- …と大きさに言いましたが、次のような感覚です
- V_p が1.0V、はじめ V_m が0.0Vだったとします
- 次の瞬間、オペアンプの機能から V_o は $+\infty$ になります
- 次の瞬間、 V_m は V_o とつながっているので $+\infty$ になります
- 次の瞬間、 $V_p < V_m$ となるので、 V_o は $-\infty$ になります
- …こういうことが起きるのではないかという予感です

数式

- 数式で考えます。前提はおペアンプの機能の式です

(1) $V_o = A(V_p - V_m)$

- この回路では出力と入力がつながっていますから

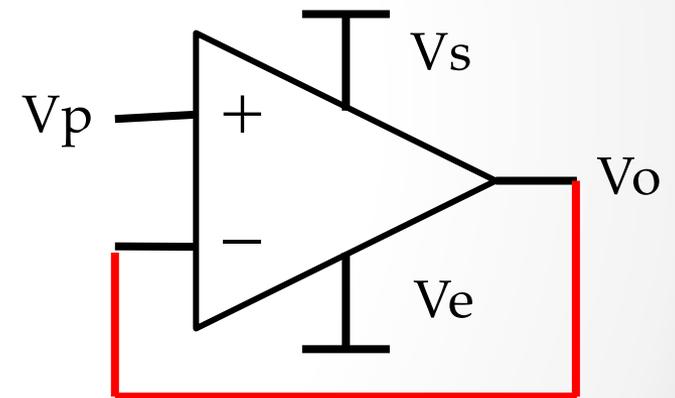
(2) $V_m = V_o$

- 式(2)を式(1)に代入すると、

(3) $V_o = A(V_p - V_o)$

(4) $(1 + A)V_o = AV_p$

(5) $V_o = A / (1 + A) \cdot V_p$

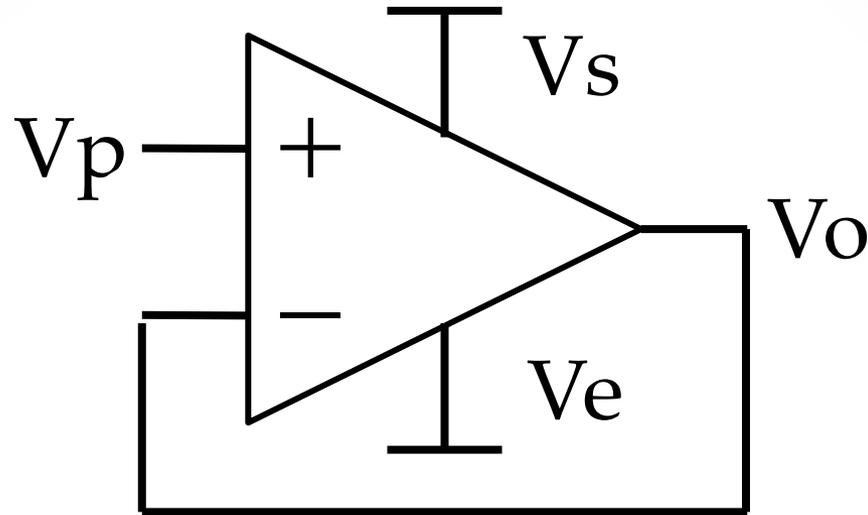


Aは非常に大きな値ですから、 $A / (1 + A)$ はほぼ「1」です。

よって結局、

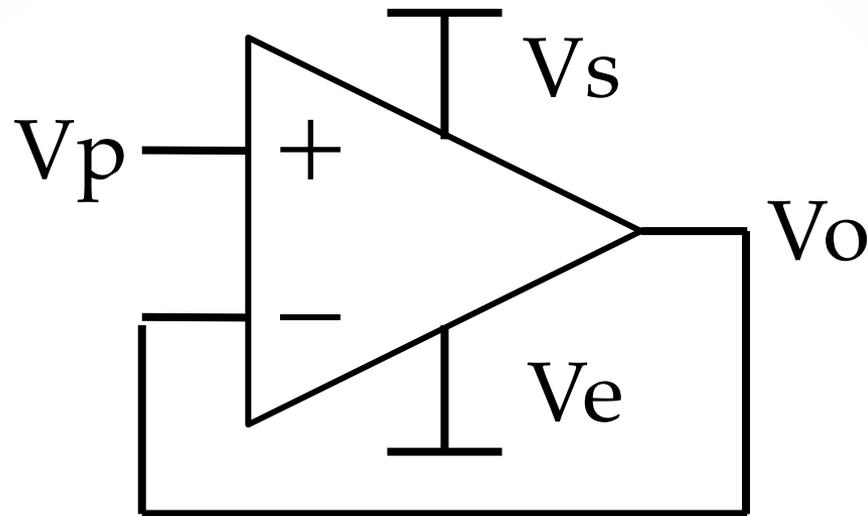
$V_o = V_p$

電圧フォロア



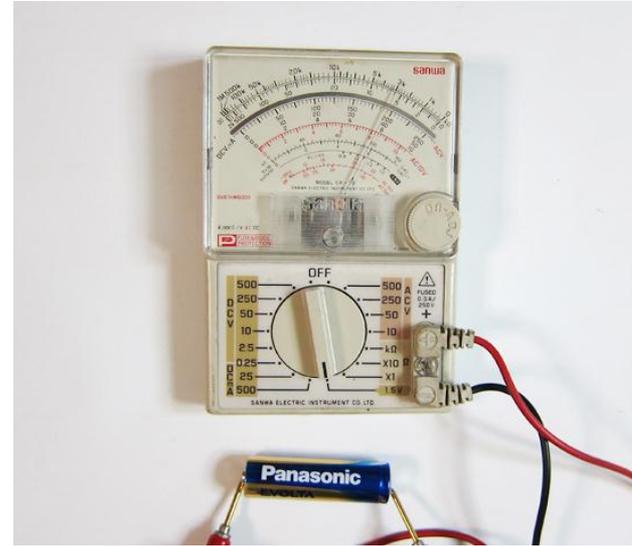
- $V_o = V_p$ 、つまりこの回路は
 - 「**入力電圧と同じ電圧を出力する**」
- 機能を持つことがわかりました
- これを**電圧フォロア**（ボルテージフォロア）と呼びます
- またこのように出力を入力に帰すことを**フィードバック**（帰還）と言います。今回は負側につなげたので、**負帰還**です

電圧フォロアの機能



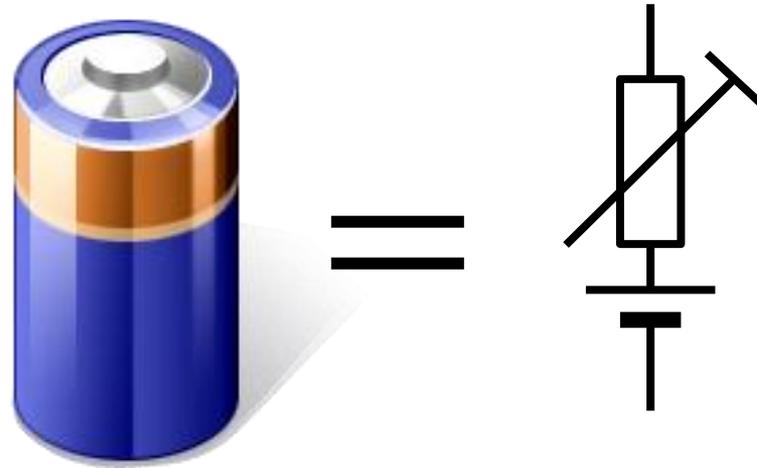
- 電圧フォロアは
 - 「**入力電圧と同じ電圧を出力する**」
- つまり、何もしないように思えます
- しかし重要な機能があります
- 「**出力インピーダンスの変換**」です
- この説明のまえに、内部抵抗の話をしたほうが良いでしょう

電池



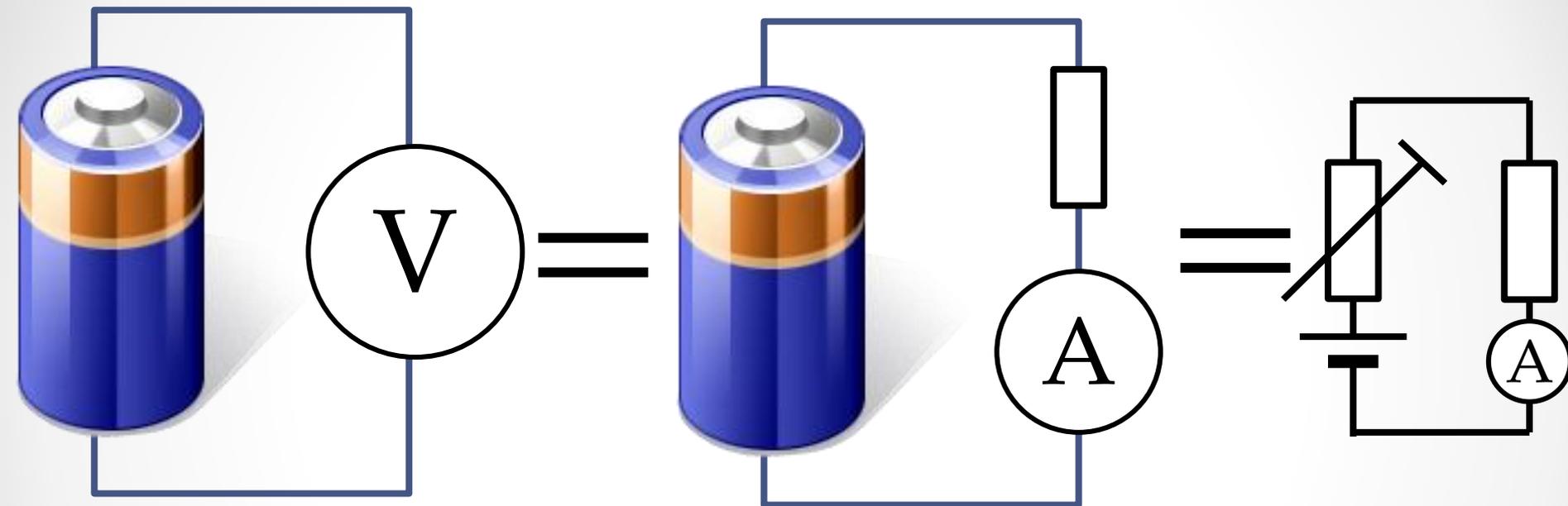
- 普段良く使う1.5Vの電池、使っていくと電圧が落ちてきます
- でも電池の**起電力**は、内部で使われている材料の「イオン化傾向」で決まりますから、使ってもその値は変わりません
- ですから**本当は電圧は変わりません**
- では何が変わったのでしょうか？

電池の内部抵抗



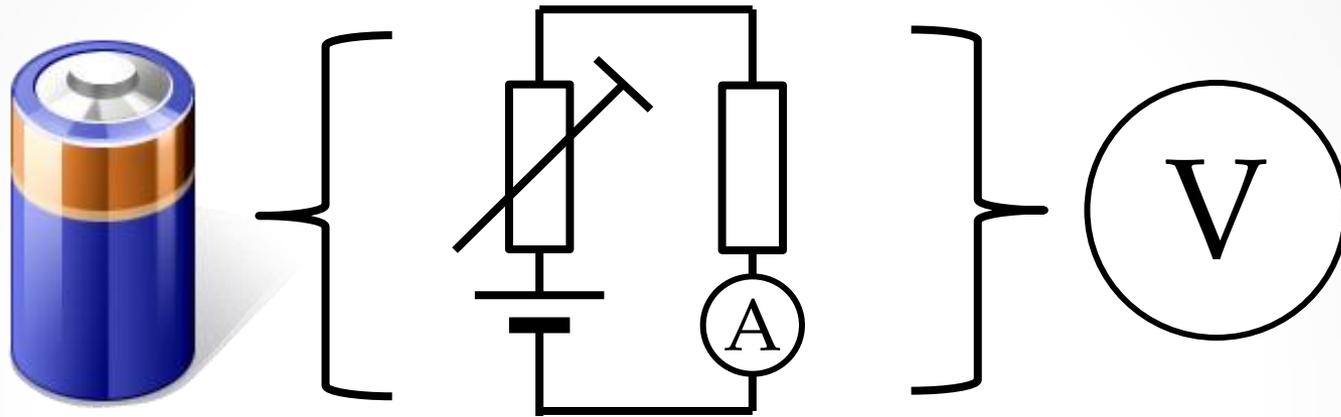
- 電池は理想的な電源ではなく、かならず内部抵抗があります
- 内部抵抗は使っていくと大きくなっていきます

電圧の計測とは



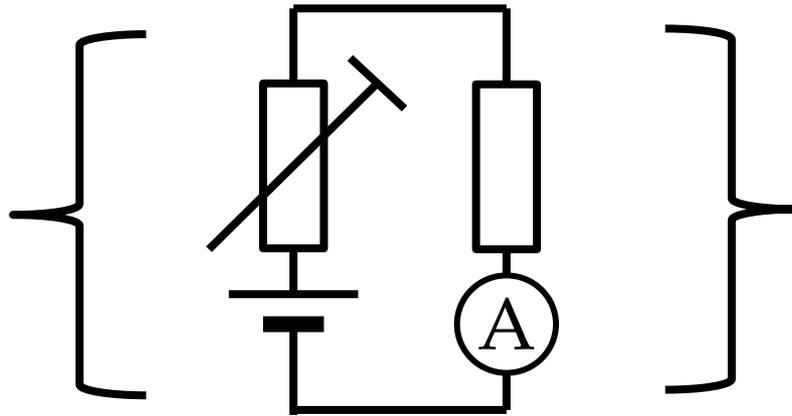
- (アナログ) 電圧計は普通、電圧そのものを計測するのではなく、抵抗 R を介して流れる電流を測定しています
- オームの法則によって電圧が計算できるという仕組みです

内部抵抗



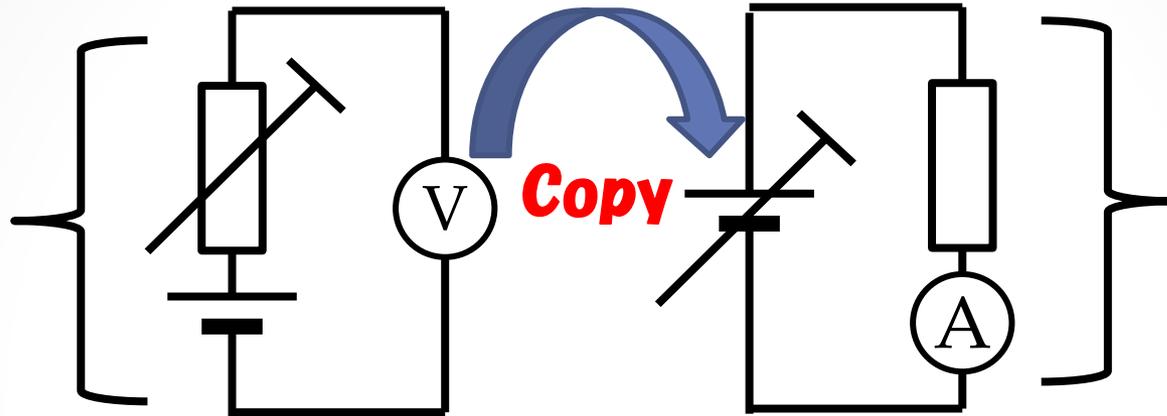
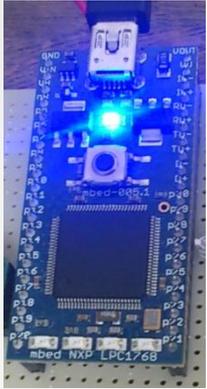
- 電池の起電力は「内部抵抗」と「電圧計の抵抗」で**分圧**されます
- このため、古くなった（＝内部抵抗の上がった）電池は、電圧計によって**電圧が下がったように観察される**ことになります
- 逆に考えれば、入力抵抗の**非常に**高い電圧計で測ると、電圧はあまり下がって見えません。
 - 極端な例として、オシロスコープで測ってみましょう
- 〰️ここまでは中学物理の復習でした

高い出力インピーダンス



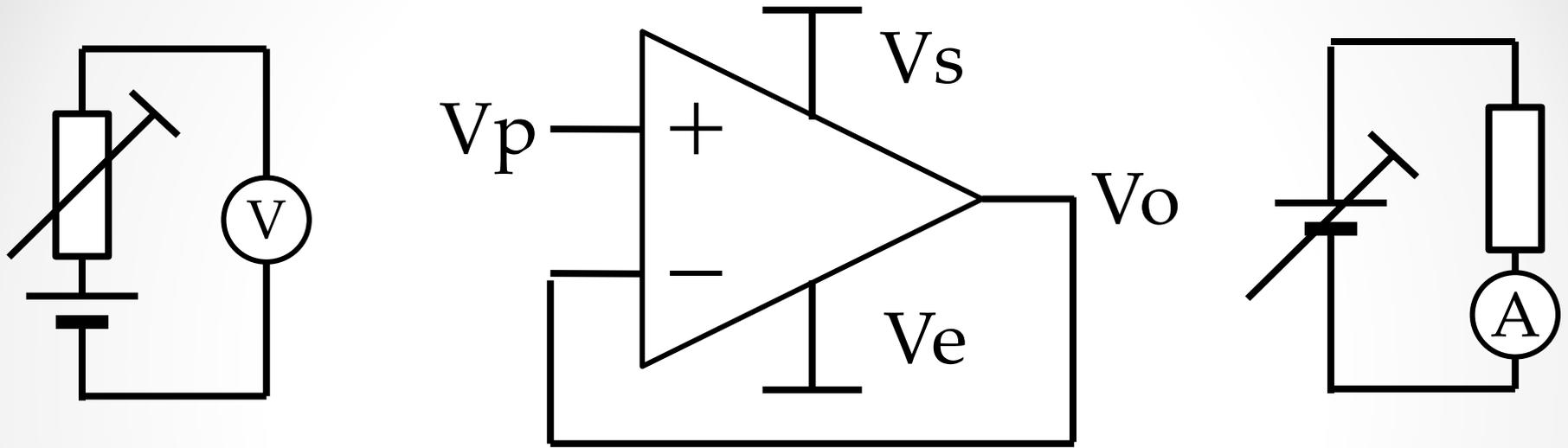
- マイコンなどからの電圧出力やセンサの出力は、出力インピーダンスが非常に大きいです。これは**使い古して内部抵抗が大きくなった電池**にあたります
- 駆動したいもの、例えばスピーカなどは、入力インピーダンスが非常に小さいです。これは**内部抵抗の小さな電圧計**にあたります
- ですから、2つを直接つないでも、まず動きません

アイデア



- これを解決するには、
 1. いったん理想的な電圧計（内部抵抗 ∞ ）で計測し、
 2. 理想的な電源（内部抵抗 0 ）でその電圧を出力、
- すればよいはずでず

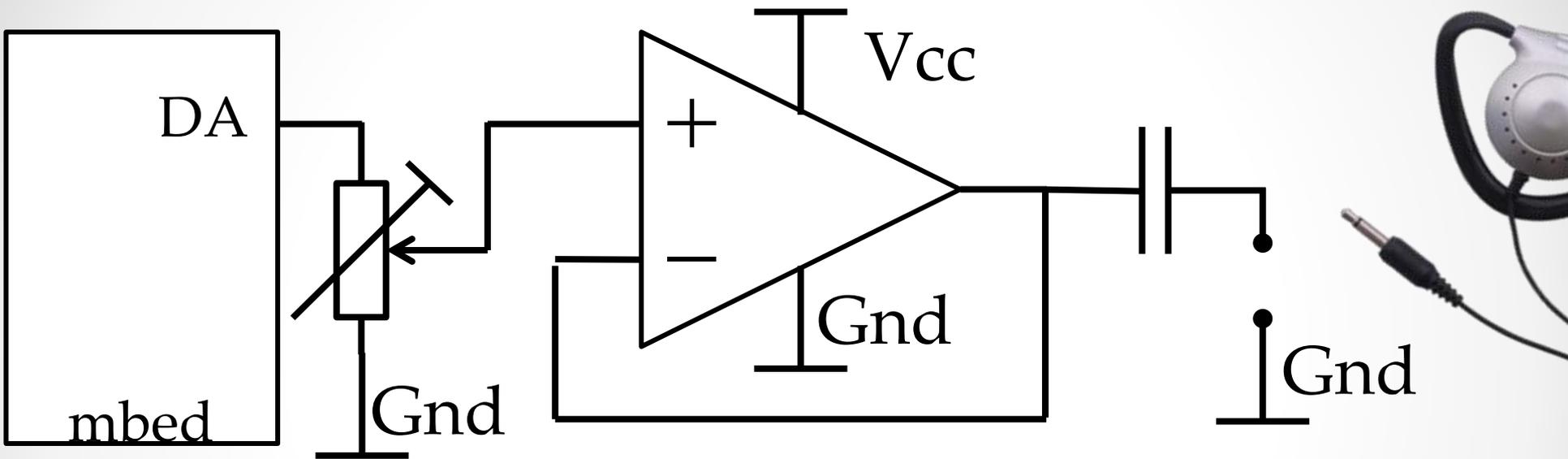
電圧フォロアの機能



- 電圧フォロアの機能は、まさにそれです
- 1. 入力端子 V_p の抵抗値は**非常に高い**です※
- 2. 出力端子の電圧は一定になるように制御されており、**出力インピーダンス0**とみなせます

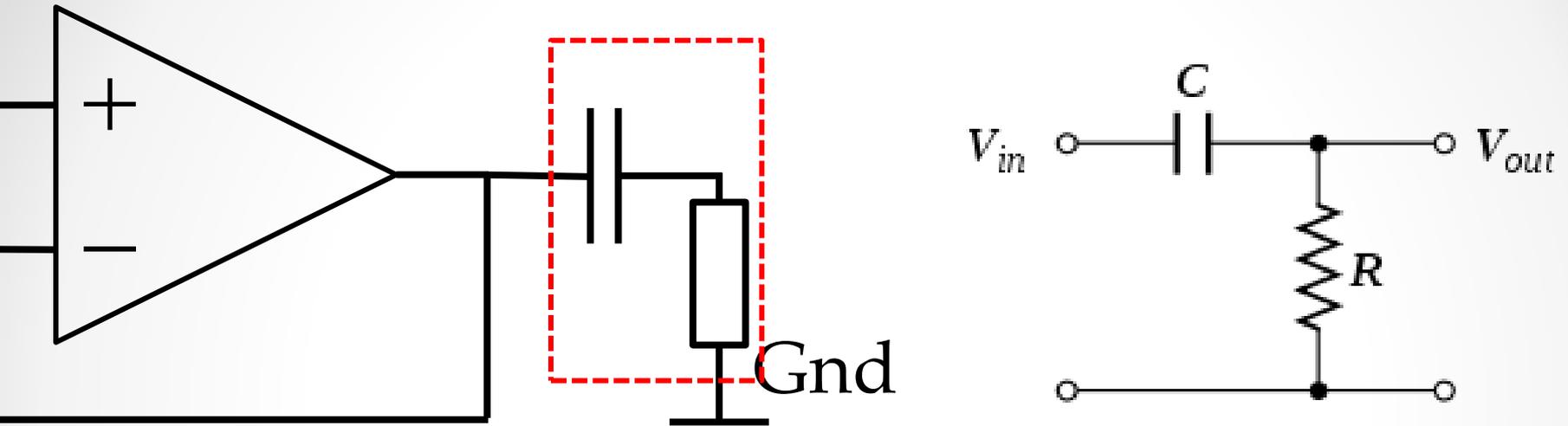
※入力インピーダンスが非常に高いこともオペアンプの重要な特徴です。数MΩ程度です

今回の回路



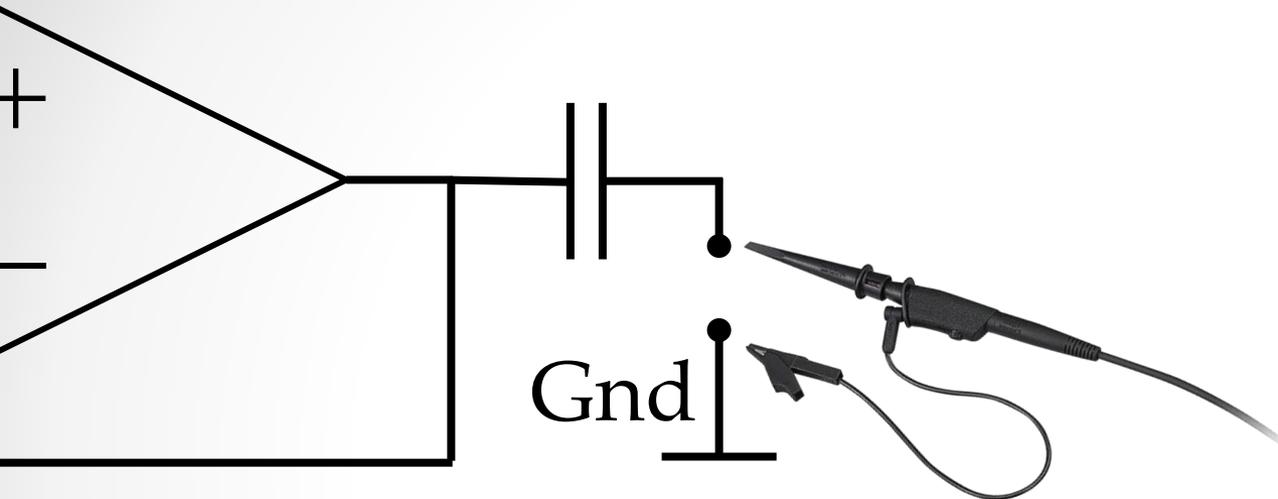
- 今回はmbedのDAポートからイヤフォンを鳴らすようにします
- オペアンプはNJM4580、音量調整用に可変抵抗を使います
- コンデンサで直流をカットしています

ハイパス



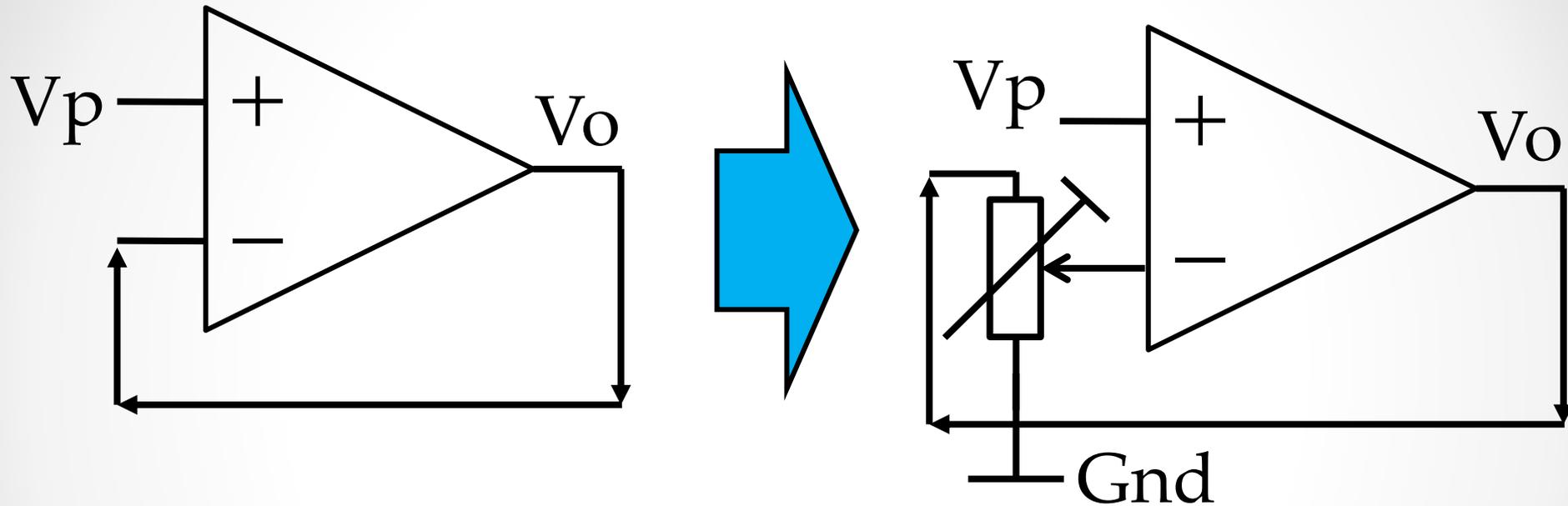
- 「コンデンサで直流をカット」と言いましたが、正確には
- 「コンデンサと、その先のイヤフォン（抵抗+コイル若干）で構成される**ハイパスフィルタ**で低周波成分をカット」する、というのが正確です
- 重要なのは**イヤフォン込みで特性が決まる**ことです。
- 例えばイヤフォンの抵抗が低いほうが低周波が出ます（回路的には）

よくある失敗



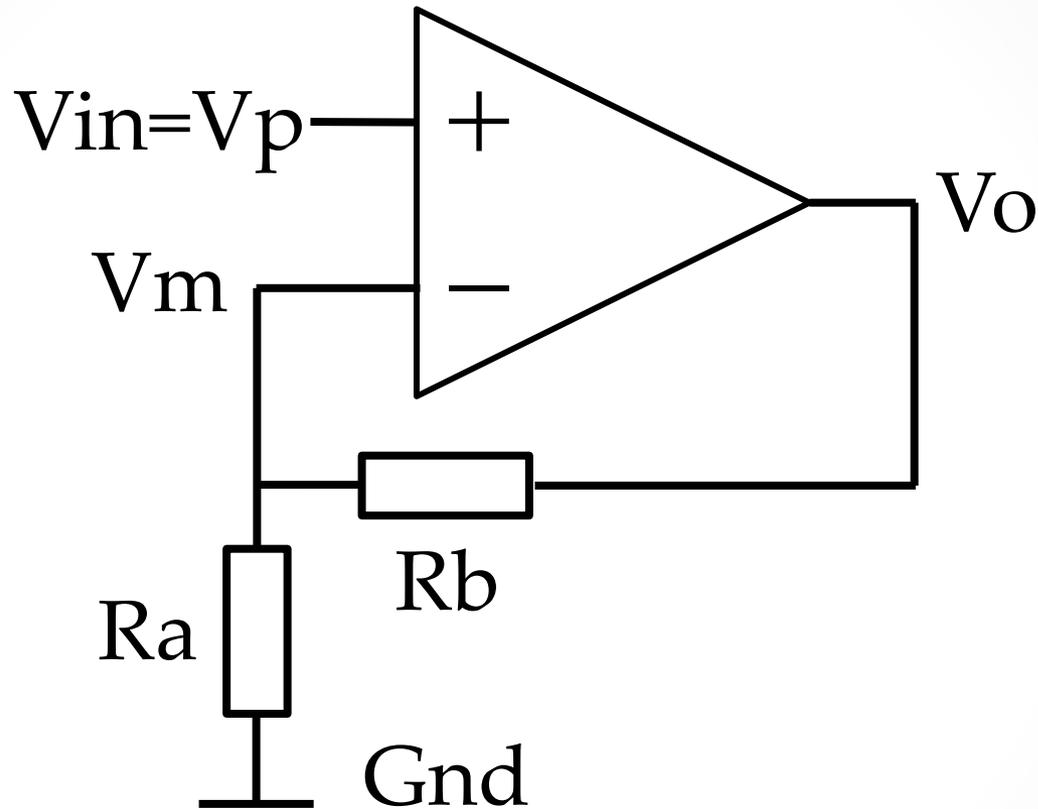
- イヤフォンを**外して**、コンデンサの先をオシロで測定する人がよくいます。「コンデンサは直流をカット」だけ知っているとうなります
- これだと**フィルタ回路が完成せず**、望んだ波形は見れません
 - PCからのオーディオ出力なども、イヤフォンジャックから直接オシロで見ると正しい波形になりません
 - やりたい場合はイヤフォン替わりの抵抗をはさんで測ります
- 「**負荷をつないで計測しないとダメ**」はいろいろな場面で出てきますので心に留めてください

負帰還の量を調整する



- 電圧フォロアは、出力を**そのまま負帰還**させました。
- この負帰還の**量を調整**することを考えましょう。
- 調整するには？**抵抗で分圧**すればよいですね

負帰還の量を調整する



- 書きなおすとこうなります。
- この時の入力 V_{in} と出力 V_o の関係を調べてみましょう。

負帰還の量を調整する

- オペアンプの機能から（この式はいつも大前提です）

(1) $V_o = A(V_p - V_m)$

- 出力が分圧されて負帰還されるので

(2) $V_m = R_a / (R_a + R_b) \times V_o$

- (2)を(1)に代入

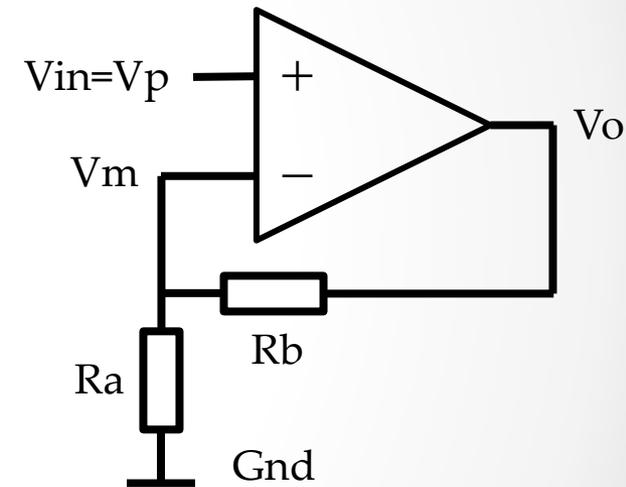
(3) $V_o = A(V_p - R_a / (R_a + R_b) \times V_o)$

- 移項して

(4) $(1 + AR_a / (R_a + R_b))V_o = AV_p$

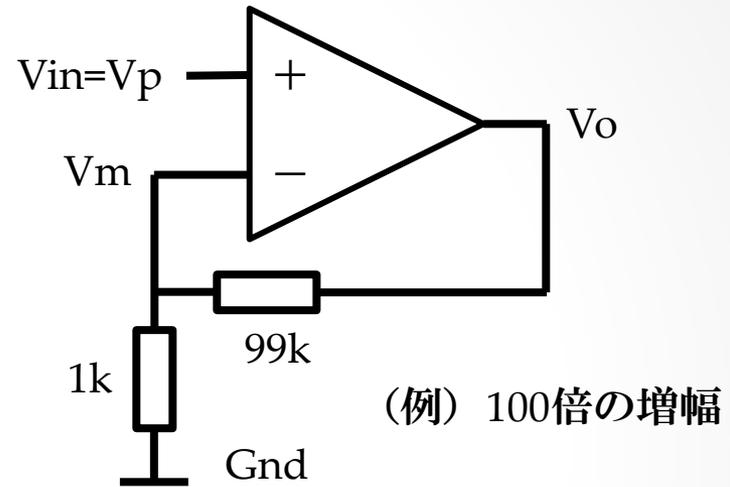
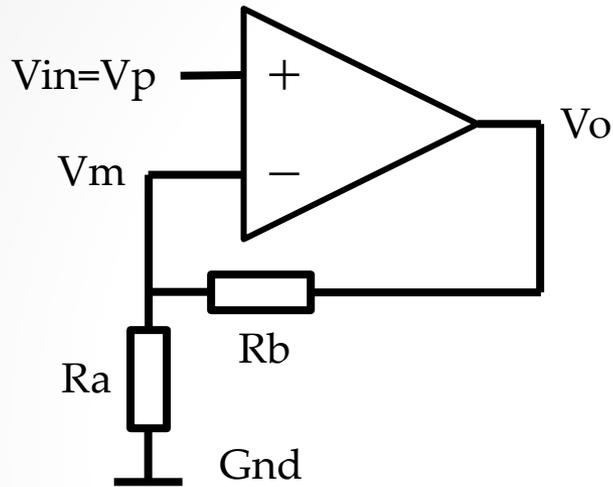
- A が非常に大きいことから左辺第一項は消えて、
• 整理すると

(5) $V_o = (R_a + R_b) / R_a \times V_p$



※かならず自分で計算してください

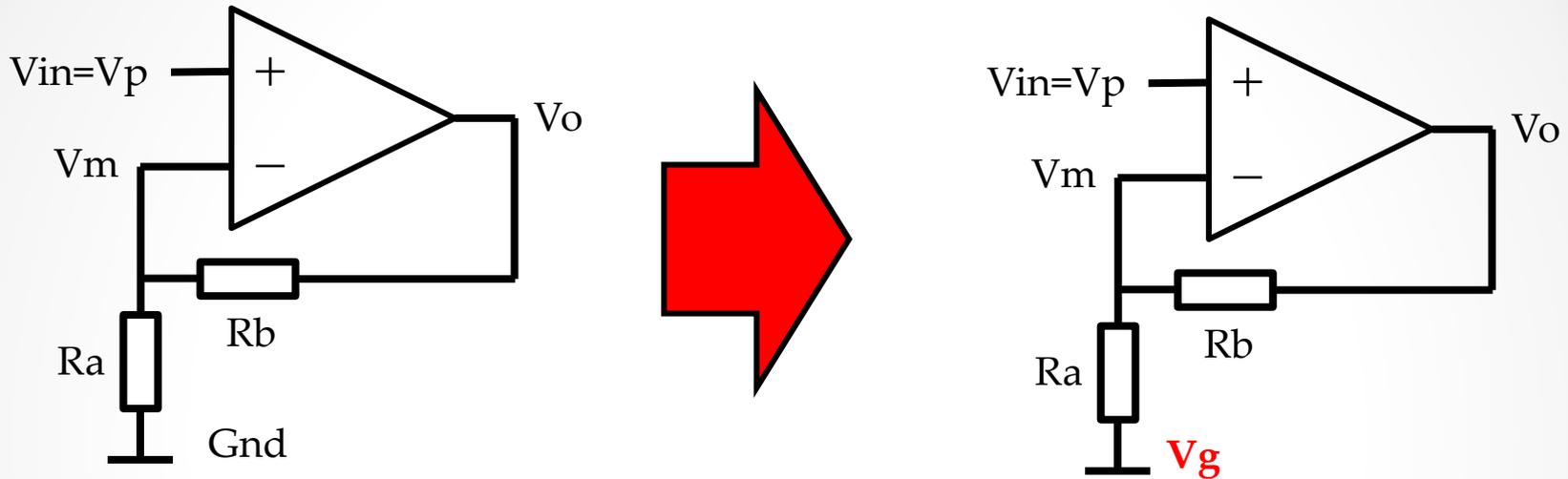
非反転増幅回路



$$\bullet \quad V_o = (R_a + R_b) / R_a \times V_p$$

- 結局、入力電圧を $1 + R_b / R_a$ 倍する増幅回路であることがわかります
- 同時に電圧フォロアと同じくインピーダンスの変換もします
- これを非反転増幅回路と言います。名前の由来はのちほど

Gndを動かしてみる



- 非反転増幅回路は、出力の負帰還を調整するために抵抗で分圧しました。
- この分圧は、グラウンド ($0V$)と出力の間で行いました。
- もしこのグラウンドの部分が $0V$ でなかったら何が起
- こるのでしょうか？ V_g とおいで計算しましょう

Gndを動かしてみる

- V_m は V_o と V_g を、抵抗 R_a 、 R_b で分圧したものですから

(1) $V_m = R_b / (R_a + R_b) V_g + R_a / (R_a + R_b) V_o$

- オペアンプの基礎の式

(2) $V_o = A(V_p - V_m)$

- に代入して

(3) $V_o = A(V_p - R_b / (R_a + R_b) V_g - R_a / (R_a + R_b) V_o)$

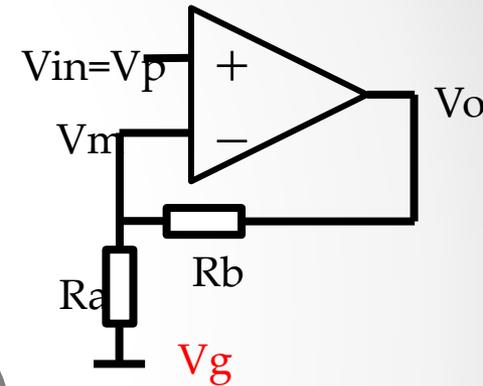
(4) $(1 + A R_a / (R_a + R_b)) V_o = A V_p - A R_b / (R_a + R_b) V_g$

- A は非常に大きいことを考えて整理すると

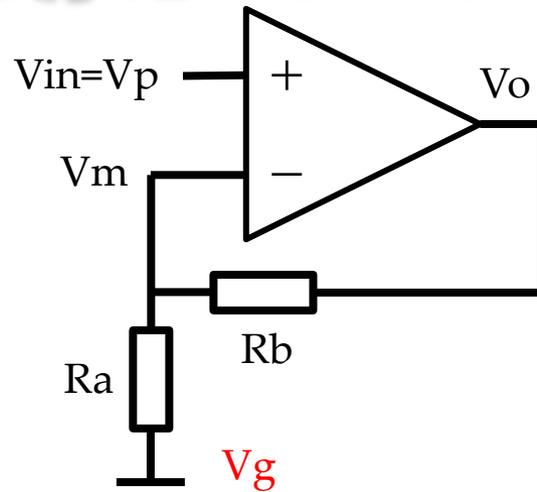
(5) $R_a / (R_a + R_b) V_o = V_p - R_b / (R_a + R_b) V_g$

結局、

• $V_o = (R_a + R_b) / R_a \times V_p - R_b / R_a \times V_g$ •



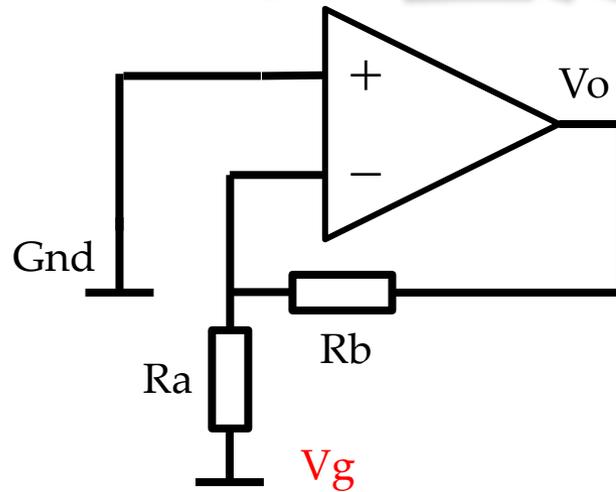
Gndを動かしてみる



$$\bullet \quad V_o = (R_a + R_b) / R_a \times V_p - R_b / R_a \times V_g$$

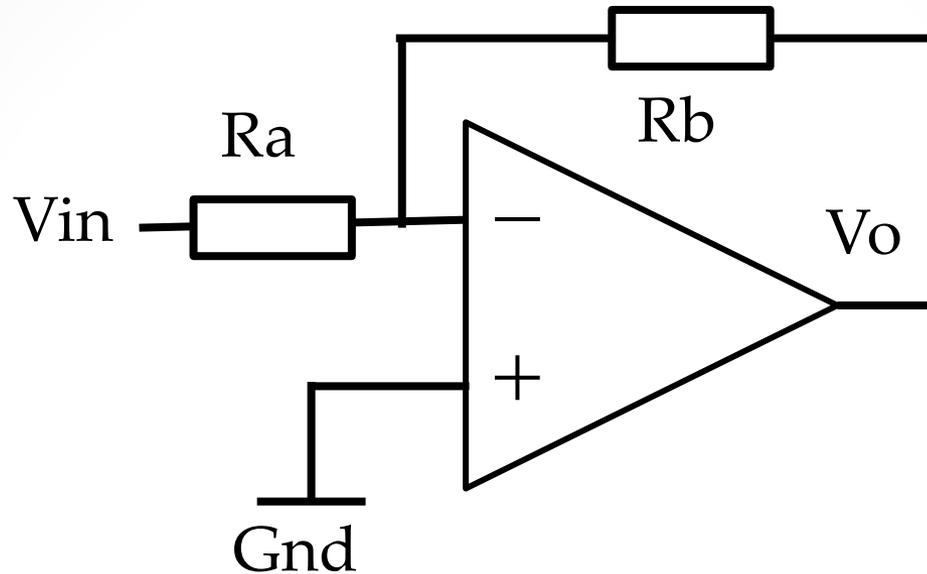
- 第一項は、これまでと同じ**非反転増幅回路**の増幅部分です
- 第二項は、「**ずれ**」 (**offset**) を表します
- 例えば、 R_b が R_a の100倍だったら？
- V_g が**0.01V**でも、出力は**-1V**ずれることになりました
- つまりこの回路、**グラウンドの変動に敏感**なようです

入力をGndに固定する



- $V_o = (R_a + R_b) / R_a \times V_p - R_b / R_a \times V_g$
- ここで見方を変えて入力電圧 V_p を Gnd につないでみましょう
- すると $V_p = 0$ ですから、右辺第一項が消えて
 - $V_o = -R_b / R_a \times V_g$
- これはつまり、 V_g が $-R_b / R_a$ 倍に増幅されたことを意味します

反転増幅回路

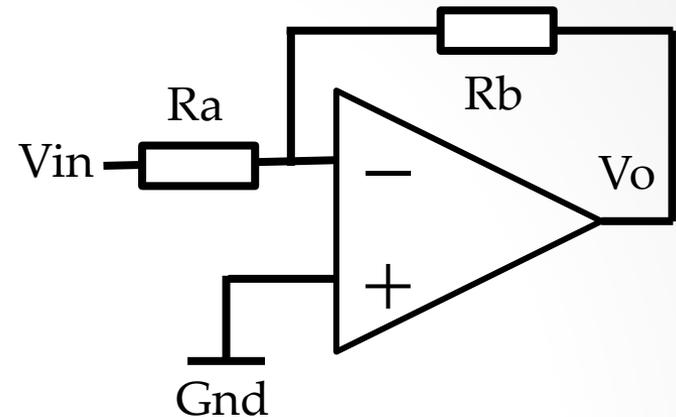
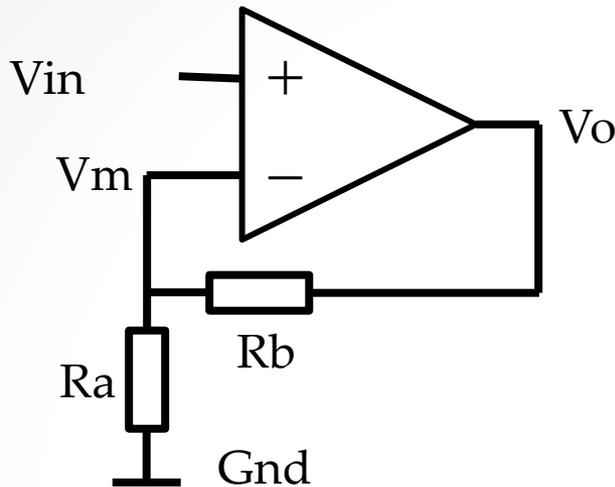


- 普通はマイナス入力側を上を持ってきて書きます

$$\bullet \quad V_o = - R_b / R_a \times V_{in}$$

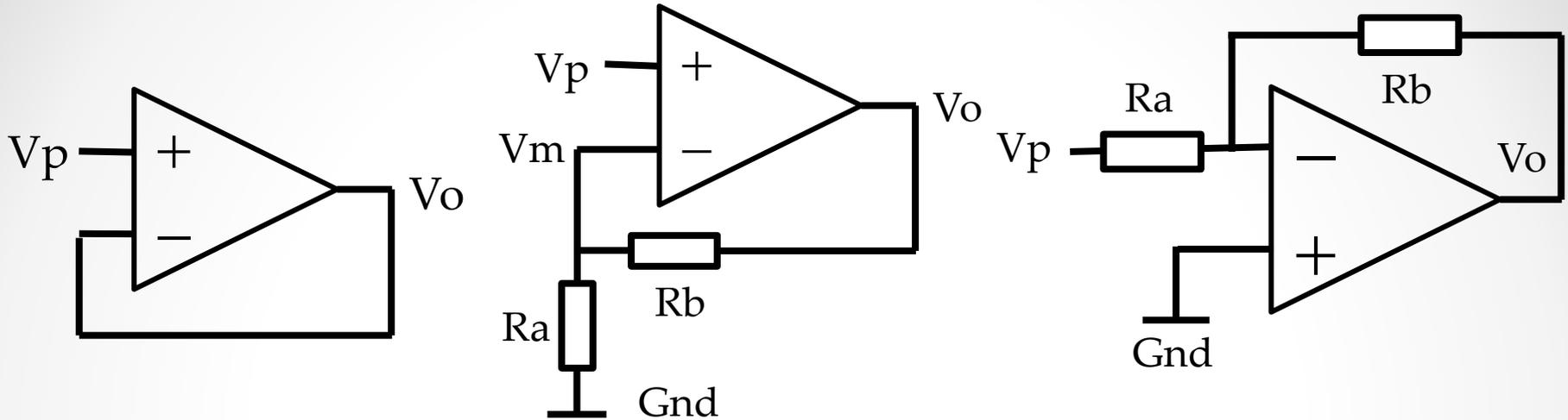
- これを**反転増幅回路**と呼びます
- 反転とついているのは、電圧が正負反転するからです
- ※先ほどの非反転増幅回路は、この逆という意味です

2つの増幅回路



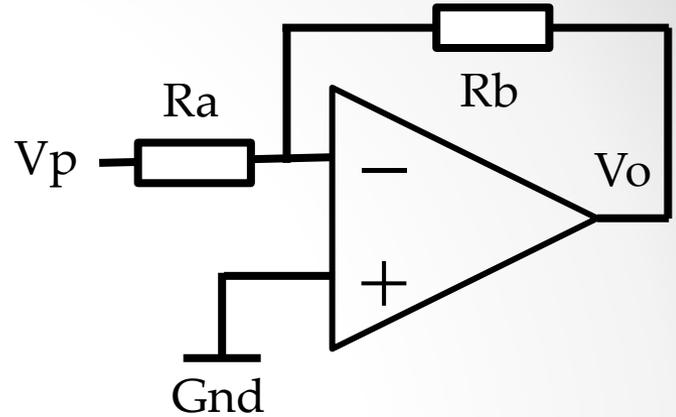
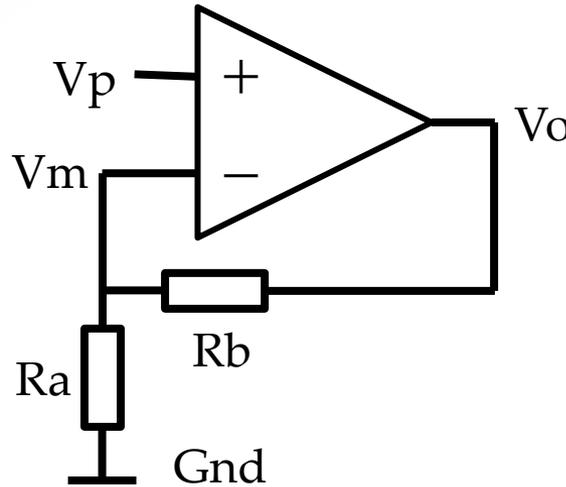
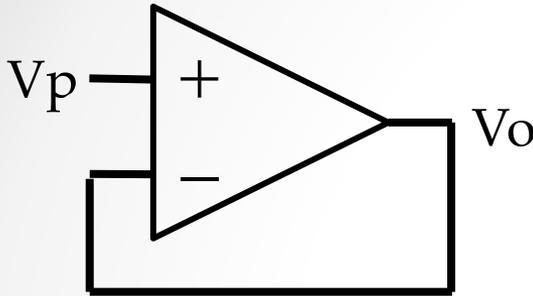
- 2つの増幅回路を比較すると次のようになります
 - **反転増幅回路** : $V_o = -R_b / R_a \times V_{in}$
 - **非反転増幅回路** : $V_o = (R_a + R_b) / R_a \times V_{in}$
- **反転増幅回路は、出力の極性が反転します**
- **非反転増幅回路は、増幅率を1倍よりも小さくできません**
- その他の違いとしては…
- 非反転増幅回路は、 V_{in} から電流は流れ込みませんが、反転増幅回路は V_{in} / R_a の電流が流れます。つまり**直前の回路**に気をつける必要があります
- 反転増幅回路のほうが安定している、あるいは非反転増幅回路のほうが周波数帯域が広い、等もあるようですが、ほぼ気にしなくて大丈夫です

計算のショートカット



- これまで紹介した回路は全て、オペアンプの基本原理
 - 「**入力の電圧差を非常に大きく増幅して出力**」
 - **$V_o = A(V_p - V_m)$ $A \rightarrow \infty$**
- から導いてきました。
- しかし結局、すべて負帰還によって、無限倍ではなく**安定した出力に落ち着いた**わけです

∞ と 0

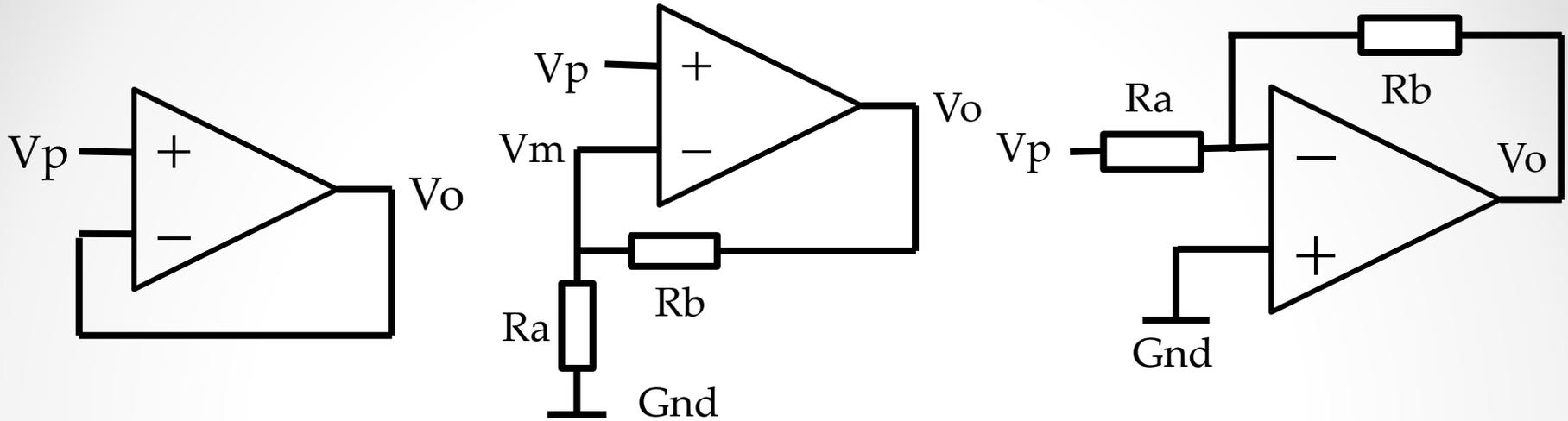


• $V_o = A(V_p - V_m)$ $A \rightarrow \infty$

- この式の左辺は**有限な値**に落ち着き、
- 右辺のうち、 A は**無限大**なわけですから、
- **数学的にこれが成立する唯一の条件は、 $V_p - V_m$ が0となることです。** つまり

• $V_p = V_m$

バーチャルショート



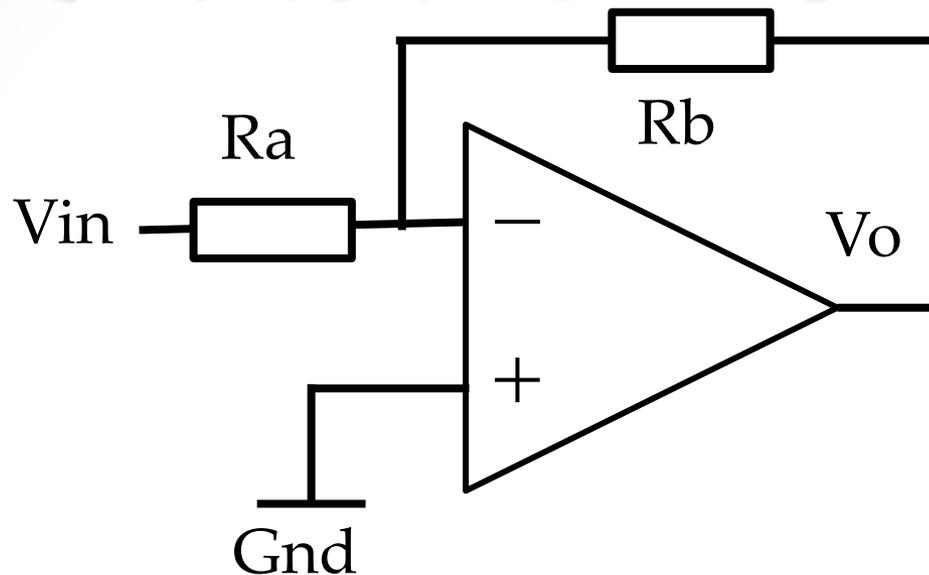
• $V_p = V_m$

- 「負帰還がかかると結局2つの入力端子の電圧は等しくなる」
- これをバーチャルショートの実理といひます

バーチャル ≠ 仮想

- **バーチャルショート**を日本語で**仮想短絡**と言う場合があります
- しかし英語のVirtualは「実質的な」という意味で、日本語の「仮想（≒想像上の）」とは意味が違います
- よってここではバーチャルショートと呼ぶことにします。文字数長いですが

反転増幅回路を バーチャルショートで解く



- 反転増幅回路をバーチャルショートで解いてみます
- マイナス入力 V_m は V_{in} と V_o を R_a と R_b で分圧した電圧ですから、

$$(1) V_m = R_a / (R_a + R_b) V_o + R_b / (R_a + R_b) V_{in}$$

- これが、プラス入力 V_p (グランドに接続) と等しいので、

$$(2) V_m = V_p = 0$$

反転増幅回路を バーチャルショートで解く

- ・ 式(2)を式(1)に代入して、

(3) $0 = R_a / (R_a + R_b) V_o + R_b / (R_a + R_b) V_{in}$

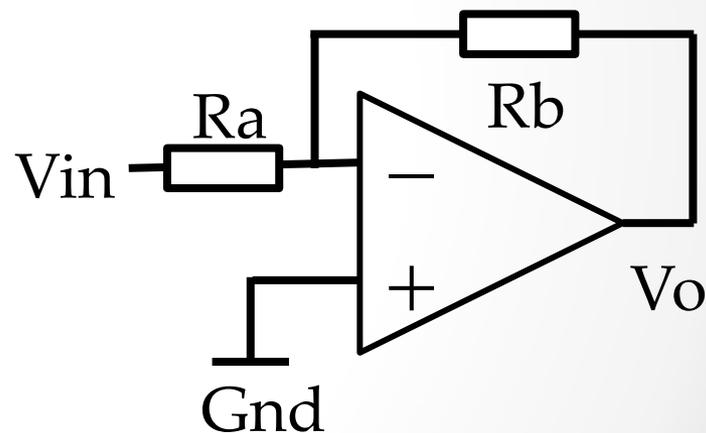
- ・ よって

(4) $R_a V_o = -R_b V_{in}$

結局

$$V_o = -R_b / R_a \times V_{in}$$

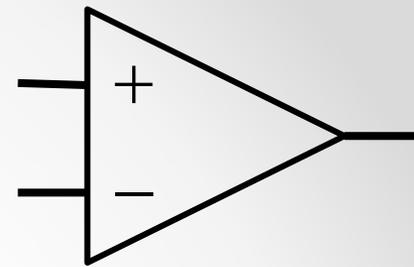
- ・ だいぶ早いステップで計算出来ました



バーチャルショート

- 非反転増幅回路についてバーチャルショート
の原理で解くのは課題としたいと思います
- バーチャルショートは計算ステップが減るので、
本によってはこの原理を先に導入して増
幅回路の働きを説明することがあります
- **しかしあくまでバーチャルショートは負帰還
と無限大增幅の結果生じる「現象」です**

まとめ



- 以上駆け足でオペアンプの機能と応用回路の一部を紹介しました
- オペアンプは「**ほぼ無限倍増幅する**」という元の機能と**負帰還の組み合わせによって、外部素子によってのみ決まる新機能を実現できる**ところに妙味があります。はっきり言って偉大な発明です
- オペアンプ回路はとてまたくさんあるので、車輪の再発明を防ぐために一度**応用回路集を眺めて**おくの良いです
- 研究室レベルでは「一旦マイコン／PCに取り込んでしまえば何とかなる」ことが増えました。しかし例えばフィルタ回路は今でも多用します。増幅回路も含め、**AD入力のダイナミックレンジを十分に活かす**ための準備として使う場面が多いようです